

# **Onde d'urto e onde di pressione indotte dai proiettili nel tessuto biologico**

-

**Definizione dei principali fenomeni causa di remote effects  
nelle ferite d'arma da fuoco.**



**Cristian Bettin  
Padova Novembre 2015  
v.02\_18**

## 1. Premessa

In balistica lesionale il termine *remote effects* raggruppa tutti i fenomeni indotti da una ferita d'arma da fuoco che si manifestano fuori dal canale di tramite principale (cavità permanente) e esternamente alla zona interessata dalla cavità temporanea.

I *remote effects* sono causati da un'azione meccanica diretta del proiettile oppure biologica, quale reazione fisiologica/patologica dell'organismo.

L'impatto di un proiettile genera nel corpo umano onde d'urto che attraversano il bersaglio. Inoltre, la dislocazione radiale dei tessuti, che dirama dall'apice del proiettile, forma la cavità temporanea, la quale induce onde di pressione che si propagano nei tessuti.

Le tre frasi sopra riportate descrivono fenomeni da tempo scientificamente validati e consolidati della balistica lesionale. I termini *onda d'urto* e *onda di pressione* sono comunemente usati in molti testi di medicina legale che trattano le ferite d'arma da fuoco e spesso anche da "esperti" balistici. Purtroppo ho notato che in tutti gli scritti italiani, da me visionati fino ad oggi, c'è una certa confusione riguardo ai due termini e spesso sono usati indifferentemente quali fossero sinonimi. Non fanno eccezione la quasi totalità dei periti balistici italiani coi quali ho avuto occasione di discutere sull'argomento.

In balistica lesionale (e non solo) un'onda d'urto e un'onda di pressione **non** sono la stessa cosa, e le conseguenze dei due tipi di sollecitazione sul bersaglio biologico differiscono anch'esse. Nel seguito spiegheremo le definizioni dei due tipi d'onda, evidenziandone brevemente le differenze da un punto di vista della fisica e con un accenno ai loro effetti sul corpo umano. Una discussione esaustiva delle onde d'urto e di pressione in balistica lesionale esula da questo scritto e si rimanda a testi e articoli specifici.

In un'ottica medica, gli effetti biologici dei *remote effects* vengono suddivisi in effetti primari e secondari. Con l'espressione *effetti primari* s'intendono tutti quelli causati direttamente dal proiettile e dai fenomeni da esso indotti, cioè la ferita a seguito del contatto diretto col proiettile, i danni causati dalla cavità temporanea, gli effetti delle onde d'urto sui tessuti, la stimolazioni di terminazioni nervose e le relative conseguenze, gli effetti delle variazioni di pressione nei vasi ecc.. Gli *effetti secondari* identificano invece le

conseguenze delle lesioni primarie, che si manifestano minuti o ore dopo la formazione della ferita.

Il corpo umano reagisce alla ferita con una serie di variazioni fisiologiche che possono manifestare conseguenze patologiche. Questo secondo aspetto del trauma da agente balistico esula però dall'ambito della balistica lesionale, che limita il proprio studio alla fisica legata all'interazione proiettile/bersaglio biologico e non si addentra in aspetti prettamente clinici.

Le cause fisiche che inducono gli effetti primari sono materia studiata da tecnici (di solito fisici e ingegneri) e correlata al corpo umano quale bersaglio, mentre gli effetti secondari sono materia esclusiva dei medici.

Non è oggetto di questo studio discutere sulle conseguenze fisiologiche o patologiche delle onde d'urto e di pressione causate da un proiettile, argomento per il quale lo scrivente non è qualificato. Esporremo però una chiara definizione dei due tipi d'onda in relazione all'impatto di un proiettile, poiché questa parte è spesso poco compresa e non compete al settore medico.

La natura fisica delle onde d'urto e di pressione non è un argomento comune nell'ambiente medico (non lo è neppure per molti indirizzi di ingegneria!), ciò non giustifica però l'uso improprio dei due termini, né la formulazioni di spiegazioni falsamente scientifiche da parte di medici legali o presunti esperti balistici, nel tentativo di spiegare o descrivere fenomeni che essi stessi non comprendono appieno. Personalmente ritengo che l'espressione ONDA D'URTO susciti nel lettore di una relazione tecnica tutt'altre sensazioni rispetto alla psicologicamente più flebile "variazione di pressione". In questi ultimi anni ho maturato il pensiero che nelle aule giudiziarie italiane è più efficace impressionare il giudice con frasi ad effetto, nelle quali "potenti onde d'urto frantumano ossa, scaraventano persone e uccidono all'istante", piuttosto che portare un ragionamento realistico e scientifico. Insomma, scrivere boiate è più proficuo ed efficace che spiegare la realtà. Peccato però che rimangono pur sempre stupidaggini.

## 2. Definizione e differenze tra onde d'urto e onde di pressione in balistica lesionale

Le **onde d'urto** (*shock waves* in inglese e *Stoßwellen* in tedesco) e le **onde di pressione** (*pressure waves* in inglese e *Druckwellen* in tedesco) non sono la stessa cosa ed è sbagliato accomunarle o usare i due termini come sinonimi. Inoltre, volendo essere corretti da un punto di vista del lessico fisico, le cosiddette onde di pressione andrebbero chiamate *variazioni di pressione* (*pressure changes* in inglese e *Druckwechsel* in tedesco).

Le onde d'urto e di pressione differiscono in primis per la loro velocità di propagazione e di durata, e poi per il loro contenuto di energia.

La durata di un'onda d'urto si misura in microsecondi (milionesimi di secondo), mentre le variazioni di pressione hanno grandezze temporali nell'ordine dei millisecondi (millesimi di secondo).

Se consideriamo il momento esatto in cui un proiettile impatta contro la superficie di un corpo quale istante in cui iniziamo ad osservare il fenomeno, vedremo che l'onda d'urto generata avrà attraversato il corpo umano quando il proiettile è ancora nella fase iniziale della penetrazione, mentre la cavità temporanea e le conseguenti variazioni di pressione si manifesteranno completamente solamente dopo che il proiettile avrà trapassato il bersaglio.

### 2.1 Onde d'urto

L'onda d'urto è una forma particolare di onda acustica. Le onde acustiche sono onde longitudinali nelle quali le particelle materiali oscillano con una certa ampiezza attorno alla loro posizione di quiete. Le onde acustiche si propagano nel mezzo con una velocità che dipende dalla temperatura e, ovviamente, dal tipo di materiale. La velocità di propagazione di onde acustiche di piccola ampiezza si chiama *velocità del suono*. La velocità del suono nell'aria è di circa 340 m/s (331 m/s a 0°C e 344 a 20°C di temperatura dell'aria) e misura invece 1400-1500 m/s in acqua, sapone e gelatina balistica (sapone e gelatina sono usati in balistica lesionale quali simulatori e strumenti di misura, per approfondimenti si veda<sup>1,2</sup>).

---

<sup>1</sup> C. Bettin, "I Proiettili – Tecnologia e balistica", Padova 2015.

<sup>2</sup> C. Bettin, "Balistica Lesionale – Teoria e Applicazioni", Padova 2018.

La velocità delle onde acustiche non dipende però solamente dalla temperatura, ma anche dall'ampiezza dell'onda pressoria. All'aumentare della pressione sale la velocità di propagazione.

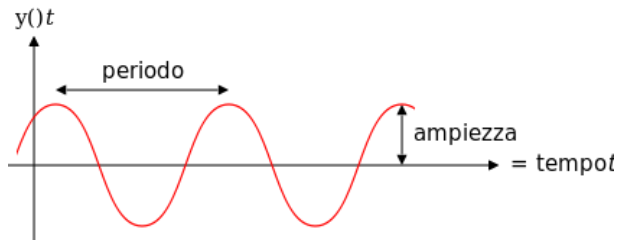


Fig. 1 Definizione di onda

L'ampiezza dipende a sua volta dalla comprimibilità del mezzo in cui si propaga l'onda (la comprimibilità è piccola nei liquidi, l'aria è facilmente comprimibile, mentre l'acqua è praticamente incompressibile). **L'onda d'urto non trasporta materia, ma può trasmettere energia!**

Onde di piccola ampiezza sono armoniche, cioè l'ampiezza della semionda positiva (sovrappressione) è uguale all'ampiezza della semionda negativa (sottopressione). Se l'ampiezza si avvicina al valore della pressione di riposo del mezzo (che in balistica lesionale è assimilabile all'acqua), o addirittura lo supera, l'ampiezza della semionda positiva può continuare a crescere senza limite, mentre la fase negativa può scendere solamente fino a un certo valore di soglia inferiore (l'acqua è circa incompressibile, ma non inestensibile).

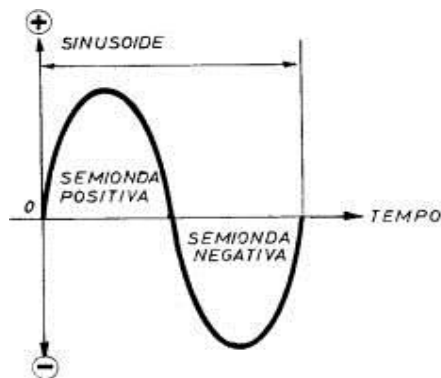


Fig. 2 Semionda positiva (sovrappressione) e semionda negativa (sottopressione).

Poiché la velocità di propagazione dell'onda aumenta al crescere della sua ampiezza, la semionda positiva si muoverà con velocità maggiore rispetto alla semionda negativa. Ne consegue che il fronte d'onda diverrà sempre più ripido. Quando questo fenomeno arriva al punto che la variazione di pressione passa dal minimo al massimo in modo discontinuo (discontinuo nell'accezione matematica di una funzione, si veda fig. 3), si parla di **onda d'urto**.

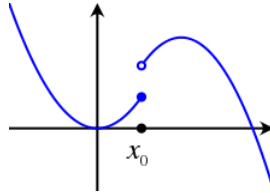


Fig. 3 Definizione di andamento discontinuo dell'onda. Il passaggio tra i due punti segnati non è più "regolare", come in fig. 2, ma c'è un "salto" nell'andamento della curva disegnata, cioè una discontinuità.

Un'onda d'urto è quindi un tipo di onda acustica che si forma a seguito di una sollecitazione improvvisa e intensa. Dopo un certo lasso di tempo, ovvero dopo che l'onda avrà percorso una certa distanza, l'onda d'urto, perdendo energia e velocità, si trasformerà in onda acustica di piccola ampiezza.

→ La pericolosità biologica di un'onda d'urto sta nel gradiente di pressione molto grande, cioè nella variazione improvvisa tra pressione positiva e negativa rispetto alla pressione di riposo. La salita di pressione del fronte d'onda è estremamente rapida, nell'ordine di alcuni **microsecondi**. Rapportando la salita del fronte alla distanza percorsa, si osserva che lo spazio interessato dal gradiente di pressione è nell'ordine delle frazioni di millimetro ( $\approx 10\mu\text{m}$ ), cioè nell'ordine di grandezza delle strutture biologiche (cellule) ed è plausibile aspettarsi reazioni cellulari.

Un'applicazione notevole delle onde d'urto in medicina è, per esempio, la distruzione dei calcoli renali (litotrissia). Le onde vengono concentrate su una piccola area e generano una pressione di 1000-1500 bar, seguite da una depressione di circa 300 bar. Facciamo notare che la frantumazione dei calcoli non viene imputata alla pressione positiva, ma alla depressione seguente, che genera sforzi di trazione e frantuma il calcolo.

Diversi studi si sono concentrati sugli effetti biologici delle onde d'urto indotte da un proiettile ed è stato osservato che:

- Non è mai stato dimostrato che un'onda d'urto abbia mai indotto una morte per "shock" o che sia capace di farlo. → Attenzione: il termine shock può aver più significati in medicina, nel nostro caso intendiamo con morte da shock una morte non preceduta da ferite tali da portare esse stesse alla morte. La potenzialità di un colpo d'arma da fuoco di uccidere un essere umano per il solo "shock" come inteso più sopra è una convinzione molto diffusa. Ad oggi non esiste però nessun caso documentato e nessuna prova che un proiettile abbia mai ucciso un essere umano solamente a seguito di tale "shock". La questione non è però da ignorare completamente, perché l'esperienza diretta ha dimostrato che alcuni animali di piccola taglia possono invece morire per shock come inteso nel nostro caso, cioè a seguito di ferite palesemente non letali se analizzate individualmente. Questo fenomeno è stato osservato in particolar modo nei conigli e nelle lepri, i quali possono morire a seguito di un colpo di fucile a pallini anche quando solo pochi proiettili hanno penetrato unicamente la cute e zone periferiche senza recidere terminazioni nervose, vasi o organi necessari alla sopravvivenza. È stato osservato che il limite di questo fenomeno sta in animali pesanti massimo 30-40 kg e, ripetiamo, non è mai stato rilevato con gli esseri umani. Esistono diverse teorie per spiegare questo fenomeno, quasi tutte basate su stimolazioni nervose che farebbero cessare all'improvviso le attività vitali, pur senza la presenza di danni fisici. Ribadiamo però che l'essere umano non è mai stato soggetto a questo fenomeno e i pochi casi che si ritenessero essere tali sono stati in seguito smentiti dalle autopsie. Ciò nonostante la comunità scientifica balistica considera l'argomento ancora aperto (non si esclude che il fenomeno documentato su mammiferi di piccola taglia possa verificarsi anche con quelli più grandi), ma per le applicazioni pratiche di balistica forense e legale, lo shock nervoso che uccide una persona è al momento ancora solo una favola.
- Eccitazione dei nervi: È stato dimostrato che le onde d'urto di ampiezza sufficiente possono eccitare i nervi. L'organo sul quale agisce il nervo non è in grado di distinguere se l'impulso elettrico ricevuto sia di natura endogena o esogena (cioè propria del corpo o proveniente da cause esterne).

→ Questo discorso è alla base delle teorie del punto precedente, perché in medicina sono noti fenomeni tipo la sindrome del seno carotideo, una situazione nella quale una pressione su un punto specifico del collo induce un abbassamento della pressione sanguigna con conseguenti vertigini ecc. (in sostanza una cosa simile alla stretta vulcaniana di Spok in Star Trek, capace di far svenire le persone).

In teoria la fisiologia della regolazione cardio circolatoria può accettare come plausibile un probabile effetto dell'onda d'urto su terminazioni nervose, che andrebbe ad interferire e rallentare/bloccare la circolazione. D'altra parte esistono però anche controargomentazioni a queste teorie, dato che un'onda d'urto che stimolerebbe il sistema parasimpatico agirebbe anche sul simpatico.

- Danni istologici causati da onde d'urto: Sono stati documentati. Riassumendo brevemente possiamo dire che in base all'intensità dell'onda d'urto (ampiezza) le cellule possono subire danni reversibili o irreparabili. Nei (pochi) esperimenti a riguardo è stato osservato che per ampiezze d'onda comprese tra 1-10 bar (i limiti degli esperimenti di SUNESON sui maiali) non sono stati osservati danni cellulari massivi.
- Effetti delle onde d'urto sul EEG: Sempre dagli studi di SUNESON si legge che spari nelle zampe posteriori dei maiali hanno indotto variazioni di pressione fino a 1,5 bar nel cervello. KNEUBUEHL non esclude quindi conseguenze fisiologiche o psichiche, congiunte a incapacità reattive o altre reazioni "mentali".

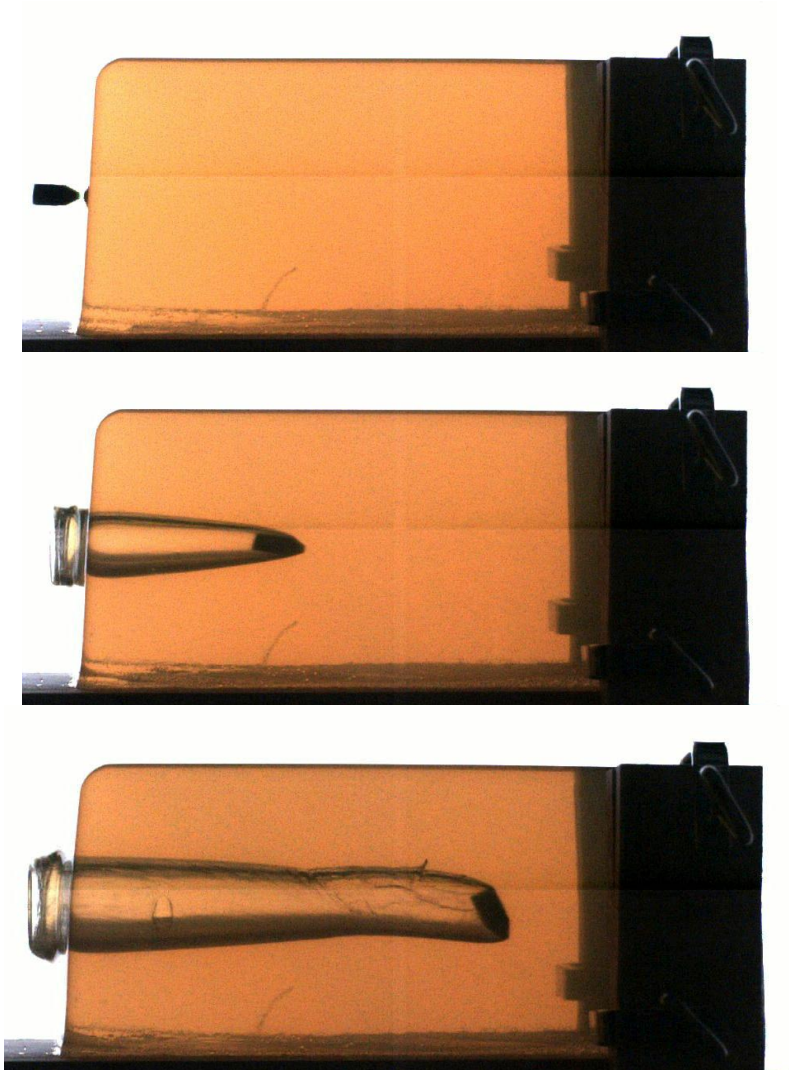
## 2.2 Onde di pressione

L'onda di pressione, più correttamente la variazione di pressione, è una conseguenza della dilatazione del tessuto a seguito del passaggio del proiettile. Il passaggio del proiettile disloca (sposta) radialmente il tessuto che si trova di fronte, spingendolo in direzione perpendicolare alla propria direzione di moto. L'intensità con cui il tessuto viene spostato è proporzionale all'energia ceduta localmente (si veda la legge di MARTEL illustrata in<sup>1,2</sup>). Per questo motivo la dimensione della cavità temporanea nei materiali isotropi (gelatina e sapone balistico) è un ottimo strumento per misurare l'energia ceduta da un proiettile.



La differenza principale con l'onda d'urto è che **ad un onda di pressione è associato uno spostamento di tessuto biologico.** La sua durata si misura in **millisecondi.**

L'onda di pressione si sviluppa dopo il passaggio del proiettile ed è chiaramente visibile con le riprese ultrarapide.



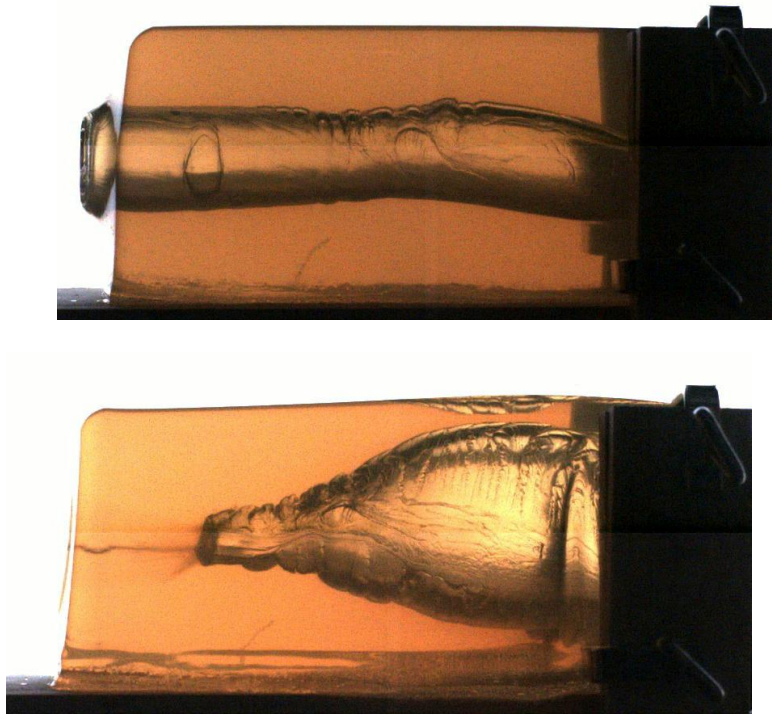


Fig. 4 Dilatazione della gelatina balistica causata dall'onda di pressione che si irradia dopo il passaggio di un proiettile. Foto tratte da una presentazione dell'Università di Würzburg e da Int J Legal Med (2007) 121:105–111.

La dilatazione dei tessuti può causare stiramenti e lacerazione degli stessi. L'estensione del danno dipenderà dal grado di stiramento e dalla resistenza del tessuto coinvolto, per questo motivo non è possibile determinare a priori il danno che farà un proiettile, ma solo il potenziale che esso possiede di generare danni. Ciò non sapendo in anticipo dove andrà a colpire uno sparo, non è mai corretto valutare un proiettile in base al suo "effetto", ma solamente in base alla "potenzialità" che ha di arrecare danno. In balistica lesionale questa potenzialità è chiamata *efficacia* e si esprime in J/cm, cioè la quantità di energia ceduta per ogni centimetro percorso in gelatina balistica.

I danni più evidenti di un colpo d'arma da fuoco sono causati dall'onda di pressione (e dall'azione meccanica diretta del proiettile), non dall'onda d'urto.

Inoltre l'azione meccanica che danneggia maggiormente i tessuti non è la compressione, ma lo stiramento. E' quindi lo stiramento dei tessuti la causa principale dei danni indotti dalla cavità temporanea (CT), e parimenti è la flessione delle ossa la causa per la quale un proiettile può fratturarle anche senza entrarne direttamente in contatto. La frattura ossea senza contatto diretto con il proiettile trova la sua giustificazione dalla flessione ossea come conseguenza dei muscoli allontanati dalla CT e poi ricollassati in posizione originaria. La flessione dell'osso induce su un lato sforzi di trazione e lo porta alla frattura.

Il meccanismo di danneggiamento dei tessuti attraverso stiramento e/o flessione richiede necessariamente un certo lasso di tempo e uno spostamento spaziale del tessuto. Due condizioni essenziali che con l'onda d'urto non si hanno, ma sono proprie variazioni di pressione, alias onde di pressione.

Oltre ai fenomeni di dilatazione/stiramento, le onde di pressione possono indurre variazioni di pressione nei vasi sanguigni, perché sottoposti a compressione. Su quest'ultimo punto non ho molte informazioni da aggiungere, dato che personalmente non ho mai condotto studi o mi sono interessato per qualche ragione alle variazioni di pressione indotte nei vasi sanguigni. Inoltre misurazioni su questo argomento sono significative solo se condotte su viventi e fuori dalla portata dello scrivente.

### **3. Conclusioni**

Abbiamo introdotto le differenze principali tra un'onda d'urto e un'onda di pressione. Dalle nozioni esposte emerge che i danni tipicamente associati alla cavità temporanea e indotti a distanza rispetto alla cavità permanente sono ascrivibili alla variazione di pressione, anche detta onda di pressione, e non a un'onda d'urto. Le onde d'urto hanno un loro effetto sul corpo umano, ma le onde d'urto derivanti dall'impatto di un proiettile sono troppo veloci e generalmente anche troppo deboli per causare danni rilevanti immediati. La velocità con cui l'onda d'urto attraversa il corpo umano è il maggiore fattore limitante alla sua potenzialità di arrecare danno.

Prima di chiudere commentiamo un paio di strafalcioni troppo frequenti nei testi di medicina legale italiani e ripetuti in molti frangenti:

- Nei cosiddetti proiettili "ad alta velocità", il danno esteso causato dalla cavità permanente non è causato dall'onda d'urto, ma dalla variazione di pressione seguente al passaggio del proiettile.

- Il proiettile “ad alta velocità” non crea un danno esteso perché supersonico, e la sua presunta “supersonicità” all’interno del corpo umano non ha alcun effetto devastante sui tessuti.
  - Dato che nessun proiettile d’arma comune supera i 1000-1200 m/s, **il proiettile che penetra un corpo umano non è mai supersonico, ma è sempre subsonico!** Il concetto di super o subsonico è relativo al mezzo in cui si muove il proiettile. Quando penetra nel corpo umano, la velocità del suono passa da 340 m/s dell’aria ai 1500 m/s circa dell’acqua (fatta eccezione per i polmoni, fino ai quali però il proiettile deve prima penetrare). Nessun proiettile d’arma comune può quindi indurre fenomeni da “conseguenze supersoniche” semplicemente perché non è mai supersonico dentro a un essere umano, muovendosi de facto molto sotto ai 1400-1500 m/s.

Le informazioni esposte sono estrapolate da *Wundballistik*, terza ediz. di Kneubeuhl, i riferimenti agli autori riportati e i due testi citati, scritti dal sottoscritto.

Ing. Cristian Bettin  
02.11.2015

ediz. rivista e corretta del 2018